中国生态农业学报 2017 年 6 月 第 25 卷 第 6 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jun. 2017, 25(6): 884−892

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.161119

许乃银, 荣义华, 李健, 付永红, 梅汉成. GGE 双标图在陆地棉高产稳产和适应性分析中的应用——以长江流域棉区国审棉花新品种'鄂杂棉 30'为例[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(6): 884−892

Xu N Y, Rong Y H, Li J, Fu Y H, Mei H C. Evaluation of upland cotton yield stability and adaptability using GGE-biplot analysis: A case study of 'Ezamian-30' cotton cultivar in Yangtze River Valley[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(6): 884−892

GGE 双标图在陆地棉高产稳产和适应性分析中的应用*

——以长江流域棉区国审棉花新品种'鄂杂棉 30'为例

许乃银[1], 荣义华[2], 李 健[1], 付永红[2], 梅汉成[2]

(1. 江苏省农业科学院经济作物研究所/农业部长江下游棉花与油菜重点实验室 南京 210014; 2. 襄阳市农业科学院 襄阳 441057)

摘 要: 农作物品种的高产稳产和广适性一直是产量育种的主要目标, 而农作物品种多环境试验中普遍存在的基因型与环境互作效应增加了广适性品种选育的难度, 科学评价品种的高产稳产和适应性有助于提高新品种的选育和应用效率。本研究采用 GGEbiplot®软件分析了 2012—2013 年长江流域国家棉花品种区域试验中'鄂杂棉 30'等参试品种丰产性、稳产性和适应性, 并采用"成对比较"功能图比较了'鄂杂棉 30'与对照品种'鄂杂棉 10 号'在目标区域的适应性表现。结果表明: 1)'鄂杂棉 30'在两年多环境品种试验中的丰产性突出, 稳产性表现优良。2)'鄂杂棉 30'在两年区域试验中的高产稳产性综合表现(即理想指数)显著优于对照品种'鄂杂棉 10 号'及其余各参试品种。3)'鄂杂棉 30'为所有参试品种中适应性最广的品种, 其最适宜种植区域涵盖了长江流域大部分棉区。4)'鄂杂棉 30'在长江流域的绝大部分棉区都比对照品种更有产量优势, 同时也优于其余参试品种, 在长江流域棉区种植优势明显。本研究展示了 GGE 双标图在品种的丰产性与稳产性分析和适宜种植区域划分等方面的应用效果, 明确了'鄂杂棉 30'是兼备丰产性、稳定性和广适性的理想品种, 可为'鄂杂棉 30'的合理利用提供理论依据, 也为其他作物品种的综合评价提供了参考方法。

关键词: 棉花(*Gossypium hirsutum* L.); GGE 双标图; 稳产性; 丰产性; 适应性; 区域试验

中图分类号: S562.03 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)06-0884-09

Evaluation of upland cotton yield stability and adaptability using GGE-biplot analysis: A case study of 'Ezamian 30' cotton cultivar in Yangtze River Valley*

XU Naiyin[1], RONG Yihua[2], LI Jian[1], FU Yonghong[2], MEI Hancheng[2]

(1. Institute of Industrial Crops, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Cotton and Rapeseed, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China; 2. Xiangyang Academy of Agricultural Sciences, Xiangyang 441057, China)

Abstract: The major challenge for a breeder is choosing genotypes with high yield and stability, which have always been the

* 国家转基因生物新品种培育重大专项(2012ZX08013015)和国家农作物品种区域试验专项(012022911108)资助
许乃银, 主要从事棉花区域试验和生态适应性模型研究。E-mail: naiyin@126.com
收稿日期: 2016-12-12 接受日期: 2017-01-10

* This research was supported by the National Transgenic Project of China (2012ZX08013015) and the Project from National Extension and Service Center of Agricultural Technology (012022911108).
Corresponding author, XU Naiyin, E-mail: naiyin@126.com
Received Dec. 12, 2016; accepted Jan. 10, 2017

main objectives of crop yield breeding. However, the ever-existing genotype-by-environment interaction has also always impeded the progress in selecting new cultivars for a wide spectrum of the environment. Scientific and reasonable assessment of the stability and adaptability of varieties are conducive for improving the selection and utilization efficiency of crop breeding. In this study, the GGE-biplot® software was used to explore and visualize yield ability, stability and adaptability of a newly registered cotton cultivar 'Ezamian 30' and other candidate lines in the same groups of national cotton trials during the period 2012–2013 in the Yangtze River Valley (YRV). Meanwhile, the "Pairwise Comparison view" of the GGE biplot was used for one-to-one comparison with the control cultivar 'Ezamian 10' for superiority of adaptability to the local conditions. The results showed that: 1) 'Ezamian 30' had a prominent high-yield and an excellent stability in the 2-year multi-environmental variety trials. 2) The integrated performance (i.e., ideal index) of 'Ezamian 30' in joint evaluation of high yield and stability was significantly superior to that of the control 'Ezamian 10' and other candidate lines in the trials. 3) The dominant suitable planting area of 'Ezamian 30' was widest among all candidate cultivars, which covered an overwhelming majority of the whole cotton planting region in YRV. 4) For one-to-one comparison, 'Ezamian 30' evidently had a beneficial planting advantage with higher yield potential than the control cultivar and other candidate lines in most of cotton growing area in YRV. This study demonstrated the effectiveness of GGE-biplot in the concurrently evaluating high yield/stability, suitable planting area delineation, etc. Furthermore, it showed the ideal characteristics of 'Ezamian 30' for high yield, stability and adaptability. Thus it provided not only theoretical guidelines for reasonable extension and utilization of 'Ezamian 30', but also set up a reference base for comprehensive evaluation of other varieties and/or crops.
Keywords: Cotton (*Gossypium hirsutum* L.); GGE-biplot; Yield stability; Productivity; Adaptability; Regional crop trial

高产稳产和广适性是农作物品种最重要的经济性状和产量育种目标[1-2]。产量性状是受多基因控制的复杂遗传性状, 受到遗传效应、环境效应以及基因型与环境互作效应的综合影响, 相同品种在不同环境中的产量表现或品种间的排序常常差异很大, 使育种家很难选育出广适性的高产稳产新品种[3-4]。基因型与环境互作效应是影响品种产量稳定性的主要因素, 对广适性品种的选育常起着关键的作用[5-6]。为了科学描述和量化基因型与环境互作效应对品种稳产性的影响, 前人提出了多种基于线性回归[7]、方差分析[8]、主成分分析[9]和奇异值分解[10]等模型的统计分析方法, 其中Zobel等[11]提出的AMMI模型和Yan等[12]提出的GGE模型分析方法是近年来最有效的统计分析方法。AMMI模型多用于基因型与环境互作效应分析或品种的稳定性分析[13], 不能有效地对品种的丰产性与稳产性进行同步分析, 因而在品种的高产和稳产性综合评价中的实用性较差[14]。GGE双标图同时考虑了品种丰产性与稳产性的信息, 是多环境品种试验中品种丰产性、稳产性和适应性的重要分析方法[15]。

目前, GGE双标图已经广泛地应用于多种作物的品种丰产性与稳产性分析[16-17]、品种适宜种植区域划分[18-19]、品质生态区划分[20-21]和试验环境评价[22-23]等研究领域, 但鲜有关于棉花(*Gossypium hirsutum* L.)品种的丰产稳产和适应性综合分析以及与对照品种成对比较的研究报道。另一方面, 湖北省襄阳市农业科学院育成的转基因抗虫杂交棉花新品种'鄂杂棉30'于2015年通过国家农作物品种审定委员会审定, 在长江流域棉区丰产性好, 推广应用面积较大, 但未见对其稳产性与适应性分析的报道。本研究应用2012—2013年长江流域国家棉花品种区域试验'鄂杂棉30'所在组别参试品种的皮棉产量数据, 分别采用GGE双标图的"丰产性与稳定性"功能图、"理想品种"功能图和"适宜种植区域划分"功能图对'鄂杂棉30'等品种的丰产性与稳产性、适宜种植区域划分进行了详细分析, 并采用"成对比较"功能图比较了'鄂杂棉30'与对照品种'鄂杂棉10号'在目标区域的适应性表现, 为'鄂杂棉30'的合理利用提供理论依据, 也为其他作物品种的高产稳产性与适应性评价提供了参考方法。

1　材料与方法

1.1　数据来源

研究数据来源于 2012—2013 年杂交抗虫棉'鄂杂棉 30'所在组别的长江流域国家棉花新品种区域试验的皮棉产量试验结果。2012 年和 2013 年试验参试品种数分别为 10 个和 8 个, 其中'鄂杂棉 10 号'为对照品种, 详见表 1。2012 年试验在四川省简阳(代号为 JY, 下同)、射洪(SH), 湖北省荆州(JZ)、江陵(JL)、襄阳(XY)、武汉(WH)、黄冈(HG), 湖南省常德(CD)、大通湖(DTH)、岳阳(YY), 河南省南阳(NY), 江西省九江(JJ), 安徽省安庆(AQ)、合肥(HF), 江苏省南京(NJ)、盐城(YC)、南通(NT), 和浙江省慈溪(CX)共设置 18 个试点, 各试点均按试验方案要求, 顺利实施和完成当年的田间试验。2013 年新增湖北省监利(DY)试点, 江陵、大通湖和常德试点因干旱

表 1 2012—2013 年长江流域国家棉花区域试验参试品种信息表

Table 1 Discription of cotton cultivars in the national cotton regional trials in the Yangtze River Valley in 2012–2013

年份 Year	品种 Cultivar	简称 Abbreviation	品种来源 Cultivar pedigree	皮棉产量 Lint yield (kg·plot^{-1})	稳产指数 Stability index	理想指数 Ideal index
2012	丰田棉 1 号 Fengtianmian 1	Ftm1	Line D3 × SJM30-1	3.28±0.57cC	0.3	1.5
	金科棉 8 号 Jinkemian 8	Jkm8	J-8 × J-14	3.02±0.57eE	0.5	2.6
	大唐 6 号 Datang 6	Dt6	HG-1 × K48	3.30±0.65cC	0.6	1.4
	鄂杂棉 10 号 Ezamian 10	Ezm10	Tai 96167 × Tai D-3	3.42±0.71bB	0.1	0.7
	泗阳 839 Siyang 839	Sy839	8027 × Siyang 739	3.42±0.60bB	0.3	0.8
	中棉所 61 Zhongmiansuo 61	Zms61	Zhong 96-2 × Zhong 9425	3.16±0.64dD	0.9	2.3
	齐棉 8 号 Qimian 8	Qm8	S-1 × Y16-4	3.10±0.67dDE	0.4	2.3
	湘杂棉 23 号 Xiangzamian 23	Xzm23	K703 × GK 19-17	3.12±0.60dD	0.6	2.1
	九杂棉 11 Jiuzamian 11	Jzm11	Jiu 0568 × Jiu 0536	3.27±0.56cC	0.3	1.4
	鄂杂棉 30 Ezamian 30	Ezm30	Xiang 203-6 × Xiang_Bt 03	3.55±0.71aA	0.1	0.2
2013	宁抗棉 2 号 Ningkangmian 2	Nkm2	H128 × Siyuan 321	2.98±0.54dD	1.1	2.4
	荃银棉 8 号 Quanyinmian 8	Qym8	5029 × Quan 97-15	3.25±0.47bB	0.2	0.8
	日辉棉 10 号 Rihuimian 10	Rhm10	Sumian 12 × SGK 321	3.25±0.60bB	0.1	0.7
	徐棉 21 号 Xumian 21	Xm21	Xu 97403/GK 19	2.78±0.75eE	0.3	2.8
	GK39	GK39	Line 82 × GK 12-01	2.95±0.73dD	1.0	2.5
	鄂杂棉 30 Ezamian 30	Ezm30	Xiang 203-6 × Xiang_Bt 03	3.45±0.58aA	0.2	0.2
	鄂杂棉 10 号 Ezamian 10	Ezm10	Tai 96167 × Tai D-3	3.17±0.58cC	0.0	1.2
	创棉 11 号 Chuangmian 11	Cm11	H011 × GK 19-11	2.96±0.52dD	0.1	2.4

每年产量数据后不同小写和大写字母分别表示在 5%和 1%水平上差异显著。Yield data in each year followed by different lowercases and capital letters are significantly different at 5% and 1% probability levels, respectively.

报废，其余试点与 2012 年相同，共 16 个试点完成试验。各试点的经度、纬度、海拔高度和所在棉区等地理信息详见先前的报道[18]。试验均采用随机区组排列，重复 3 次，小区面积 20 m^2。

1.2 统计分析方法

首先，采用 GGEbiplot®软件[24]的“丰产性与稳定性”功能图[25](mean vs. stability view)比较参试品种的丰产性与稳产性。丰产性与稳产性功能图中的小圆圈代表平均环境(图 1)，即各试点坐标的平均值；带箭头的直线通过双标图的原点和平均环境坐标称为平均环境向量或平均环境轴(average environment abscissa，AEA)，它的正方向代表品种的平均高产方向，各品种图标在 AEA 轴上垂足的相对位置代表了品种的丰产性，越接近正方向其丰产性越好[15,26]。与 AEA 轴垂直并通过原点的双箭头直线为平均环境轴的纵轴(average environment coordinate，AEC)，箭头偏离 AEA 轴的方向表示品种的产量不稳定性，越靠近 AEA 轴则越稳定[27]。品种向量在 AEC 轴上的投影距离称为稳产性指数(stability index)，数值越小稳产性越好。其次，用 GGE 双标图的“理想品种”功能图[5,25](ideal cultivar view)对品种的丰产性与稳产性同步筛选[5,25]。所谓“理想品种”是指在 GGE 双标图中距原点距离等于最长品种向量的长度，并且位于平均环境轴正方向上的品种[16,25]。在双标图中各参试品种与理想品种的相对距离称为理想指数(ideal index)，数值越小越理想。同时，以理想品种为圆心画出若干个同心圆以直观地评价品种的理想程度[16]。然后，用 GGE 双标图的“适宜种植区域划分”功能图[16,25](Which-Won-Where view)划分各品种的适宜种植区域。在 GGE 双标图中将位于最外围的品种图标依次连接形成一个多边形，就可以将所有品种图标包围在多边形内；从双标图的原点作多边形各边的垂线，将多边形划分为不同的扇区，在同一扇区内的环境即构成了 1 个环境组合；每个扇区中位于多边形角顶上的品种就是在该扇区内各环境中表现最好的品种，称为“胜出品种”，也就是该环境组合区域中表现最好的品种[25]。最后，用 GGE 双标图的“成对比较”功能图[16](pairwise comparison view)比较‘鄂杂棉 30’与对照品种‘鄂杂棉 10 号’在目标环境中的优势种植区域。在 GGE 双标图中用直接连接两个相互比较的品种图标，再通过双标图原点作两品种连线或其延长线的垂线，这条垂线称为“等值线”，在等值线上的任意环境中这两个品种的数值均相等，而品种在等值线同侧的环境中表现更好；如果两品

种位于等值线的同侧, 则远离等值线的品种在同侧环境中表现更好, 接近等值线的品种在等值线的另一侧环境中表现更好[25]。

2 结果与分析

2.1 皮棉产量方差分析

对 2012—2013 年长江流域国家棉花区试品种皮棉产量进行多环境联合方差分析, 结果表明(表 2), 在皮棉产量表型变异来源中, 基因型主效应(G)、环境主效应(E)和基因型与环境互作效应(GE)均达极显著水平。其中, 2012 年基因型主效应、环境主效应和基因型与环境互作效应的变异分别占处理总变异的 6.2%、85.6%和 8.2%, 2013 年基因型主效应、环境主效应和基因型与环境互作效应的变异分别占处理总变异的 10.9%、70.7%和 18.4%。可见, 环境主效应是皮棉产量变异的主要来源, 但其对基因型评价没有作用, 采用 GGE 模型可以剔除环境效应, 以利于对基因型的科学评价。另一方面, 两年方差分析中基因型与环境互作效应对处理变异的贡献率都大于基因型主效应, 说明有必要对基因型与环境互作效应进行进一步分析, 以科学划分各参试品种的适宜种植区域。

表 2　2012—2013 年长江流域国家棉花区试品种皮棉产量的联合方差分析
Table 2　Combined analysis of variance for cotton lint yield from the national cotton regional trials in the Yangtze River Valley in 2012–2013

年份 Year	变异来源 Variation source	自由度(*df*) Degree of freedom	平方和(SS) Sum of squares	均方(MS) Mean square	*F*
2012	区组 Block	36	3.135	0.087	3.139**
	基因型 Genotype (G)	9	13.240	1.471	53.028**
	环境 Environment (E)	17	181.471	10.675	384.786**
	基因型×环境 (GE)	153	17.310	0.113	4.078**
	误差 Error	324	8.988	0.028	
	总变异 Total	539	224.145		
2013	区组 Block	32	1.380	0.043	2.254**
	基因型 Genotype (G)	7	16.041	2.292	119.768**
	环境 Environment (E)	15	104.302	6.953	363.428**
	基因型×环境 (GE)	105	27.203	0.259	13.541**
	误差 Error	224	4.286	0.019	
	总变异 Total	383	153.212		

表示差异极显著(P<0.01)。 indicates significant difference at 0.01 level ($P < 0.01$).

2.2 ‘鄂杂棉 30’的丰产性和稳产性分析

对 2012—2013 年长江流域国家棉花区试品种产量差异的多重比较(LSD 法)结果列于表 1, 结果表明‘鄂杂棉 30’的皮棉产量两年都极显著地高于对照品种‘鄂杂棉 10 号’及其余参试品种。

利用 GGE 双标图的“丰产性和稳产性”功能图对各品种的丰产性(图 1 中图标在平均环境轴正方向的投影距离)进行分析(图 1)。由图 1a 可见, 2012 年各参试品种的丰产性高低次序为‘鄂杂棉 30’(简称 Ezm30, 下同)>‘鄂杂棉 10 号’(Ezm10)>‘泗阳 839’(Sy839)>‘大唐 6 号’(Dt6)>‘九杂棉 11’(Jzm11)>‘丰田棉 1 号’(Ftm1)>‘中棉所 61’(Zms61)>‘湘杂棉 23 号’(Xzm23)>‘齐棉 8 号’(Qm8)>‘金科棉 8 号’(Jkm8), 其中‘鄂杂棉 30’图标在平均环境轴上的垂足最接近其正方向, 与其余品种距离较远, 表明‘鄂杂棉 30’的丰产性明显优于其余品种, 与品种间产量差异多重比较的结果一致。由图 1b 可见, 2013 年各参试品种的丰产性高低排序为‘鄂杂棉 30’(Ezm30)>‘日辉棉 10 号’(Rhm10)>‘荃银棉 8 号’(Qym8)>‘鄂杂棉 10 号’(Ezm10)>‘宁抗棉 2 号’(Nkm2)>‘GK39’>‘创棉 11 号’(Cm11)>‘徐棉 21 号’(Xm21), 其中‘鄂杂棉 30’的产量同样明显地高于其余各参试品种, 亦与其多重比较结果相符合。

2012 年各品种的稳产性分析结果表明(图 1a, 表 1), ‘鄂杂棉 10 号’和‘鄂杂棉 30’的图标在平均环境轴纵轴(AEC 轴)上的投影距离最短, 稳产指数最低, 因而其稳产性最好; ‘泗阳 839’、‘九杂棉 11’、‘丰田棉 1 号’、‘齐棉 8 号’和‘金科棉 8 号’的稳产性较好; ‘湘杂棉 23 号’和‘大唐 6 号’的稳产性较差; ‘中棉所 61’的垂距最长, 稳产性差。2013 年各品种的稳产性表现为(图 1b, 表 1): ‘鄂杂棉 10 号’的图标落在平均环境轴上, 稳产指数为 0, 其稳产性表现最好; ‘鄂杂棉 30’、‘日辉棉 10 号’和‘荃银棉 8 号’的稳产性表现

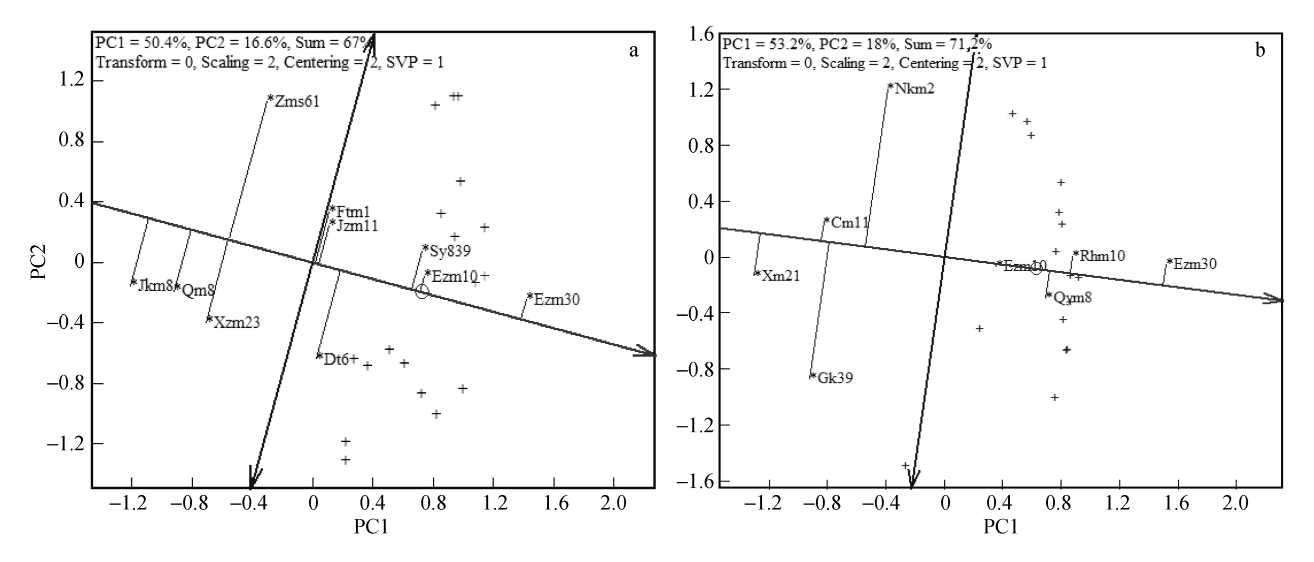


图 1 2012 年(a)和 2013 年(b)长江流域棉花区试皮棉产量 GGE 双标图的“丰产性与稳产性”功能图

Fig. 1 Mean vs. stability view of the GGE biplot for cotton lint yield data from the cotton regional trials in the Yangtze River Valley in 2012 (a) and 2013 (b)

图中“+”表示试点图标位置；带“*”的图标为品种简称，详见表 1。The plus sign (+) shows the position of the test location. “*” and the following abbreviation is cultivar name, the full name of cultivar lists in Table 1.

优良；‘徐棉 21 号’的稳产性较好；而‘宁抗棉 2 号’和‘GK39‘的稳产性差。可见，‘鄂杂棉 30’在两年区域试验中的丰产性突出，稳产性表现优良。

2.3 ‘鄂杂棉 30’的理想指数分析

GGE 双标图中的理想品种是所有品种中向量最长、并落在平均环境轴正方向上的虚拟品种，具有最理想的高产稳产性。作为参试品种的丰产性与稳产性综合评价的参照，各品种图标与理想品种之间的相对距离称为理想指数，数值越小越理想。由图 2a 和表 1 可知，2012 年各参试品种中最接近于“理想品种”的是‘鄂杂棉 30’，理想指数接近于 0，说明其丰产性与稳产性的综合表现最优；‘鄂杂棉 10 号’和‘泗阳 839’较为理想；‘丰田棉 1 号’、‘九杂棉 11’和‘大唐 6 号’表现一般；‘中棉所 61’、‘齐棉 8 号’和‘湘杂棉 23 号’综合表现较差；‘金科棉 8 号’综合表现最差。由图 2b 和表 1 可见，2013 年各参试品种中理想指数

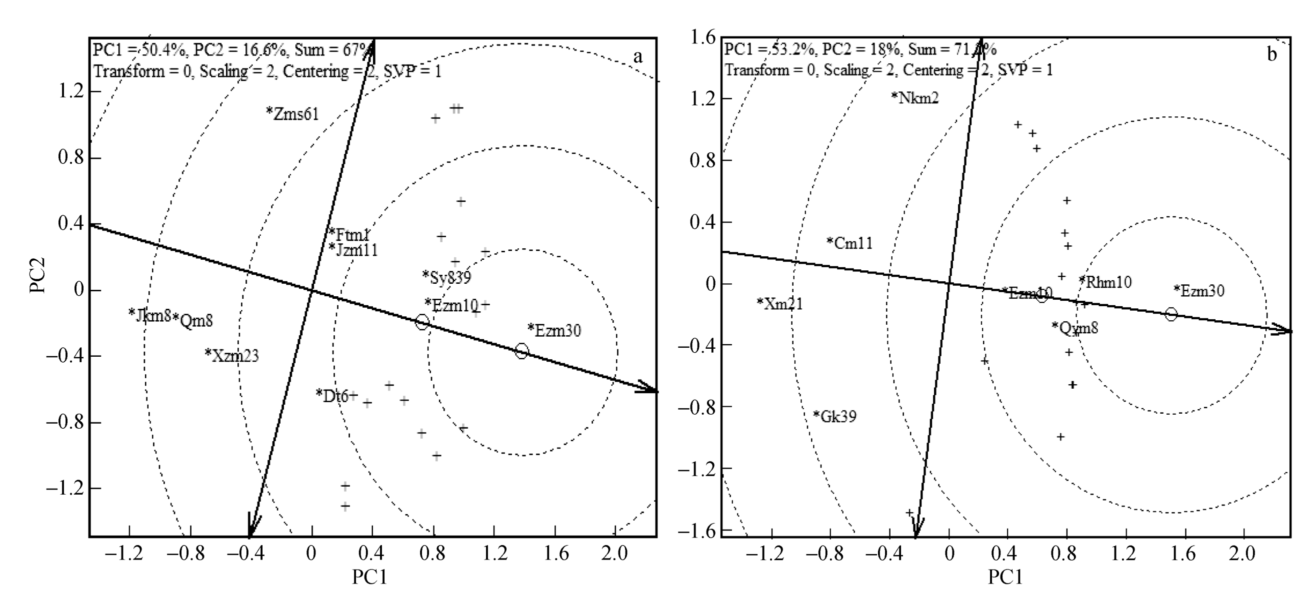


图 2 2012 年(a)和 2013 年(b)长江流域棉花区试皮棉产量 GGE 双标图的“理想品种”功能图

Fig. 2 Ideal cultivar view of the GGE biplot for cotton lint yield data from the cotton regional trials in the Yangtze River Valley in 2012 (a) and 2013 (b)

图中“+”示试点图标位置；带“*”的图标为品种简称，详见表 1。图中位于同心圆圆心的小圆圈是理想品种的图标。The plus sign (+) shows the position of the test location. “*” and the following abbreviation is cultivar name, the full name of cultivar lists in Table 1. “○” at the center of concentric circle is the mark of the ideal cultivar.

表现最好的品种也是‘鄂杂棉 30’，其品种图标很接近于理想品种，高产稳定性综合表现很理想；‘日辉棉 10 号’、‘荃银棉 8 号’和‘鄂杂棉 10 号’的高产稳产表现也较理想；而‘宁抗棉 2 号’、‘创棉 11 号’、‘GK39’和‘徐棉 21 号’理想指数较差。可见，‘鄂杂棉 30’在两年区域试验中的高产稳产性综合表现显著优于对照品种‘鄂杂棉 10 号’及其余各参试品种。

2.4　‘鄂杂棉 30’的适宜种植区域划分

GGE双标图中经过原点到最外围品种图标连线形成的多边形各边的垂线可以将目标区域划分为不同的扇形区域，其中位于多边形角顶的品种就是落在其所在扇区试验环境中表现最好的品种，试验环境代表的生产区域就是该品种的最适宜的种植区域。图3a表明，2012年参试品种中位于多边形角顶的“胜出品种”包括‘鄂杂棉30’、‘大唐6号’、‘中棉所61’、‘金科棉8号’和‘湘杂棉23号’。其中，‘大唐6号’所在扇区中包括安徽省安庆市和湖南省岳阳市，表明‘大唐6号’在安庆和岳阳试验环境中的丰产性优于其余品种；‘鄂杂棉30’所在扇区涵盖了长江流域上游和下游棉区的全部目标环境，以及除安庆和岳阳试验环境以外的长江中游棉区，代表了长江流域的主产棉区，表明‘鄂杂棉30’是长江流域适宜种植区域最广泛的品种；而其余“胜出品种”所在扇区中并不包含试验环境，表明其不适宜在长江流域棉区种植。图3b表明，2013年参试品种中位于多边形角顶的“胜出品种”包括‘鄂杂棉30’、‘宁抗棉2号’、‘GK39’和‘徐棉21号’。其中，‘宁抗棉2号’的最适宜种植区域包括江西省九江市和四川省简阳市；‘GK39’的最适宜种植区域为浙江省慈溪市；‘鄂杂棉30’最适宜种植区域包括其余13个试验点所代表的大部分长江流域棉区，为参试品种中适宜种植区域最广的品种。可见，根据2012—2013年长江流域棉花区域试验产量数据，‘鄂杂棉30号’为所有参试品种中适应性最广的品种，其最适宜种植区域涵盖了长江流域的绝大部分棉区。

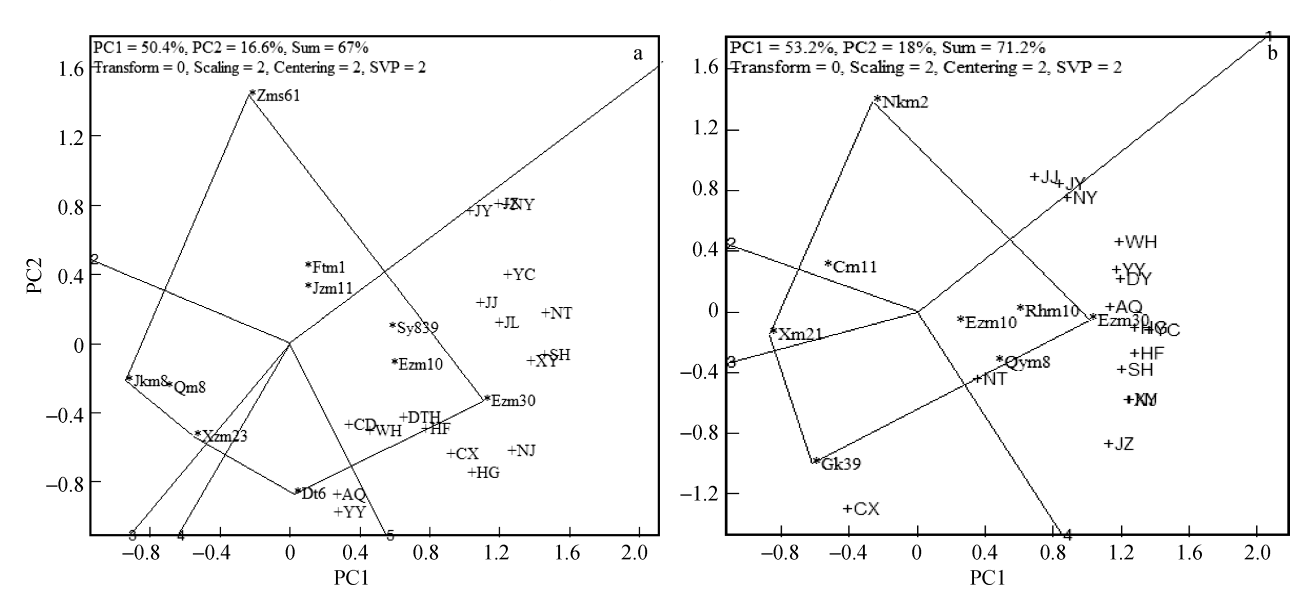


图 3　2012 年(a)和 2013 年(b)长江流域棉花区试皮棉产量 GGE 双标图的“适宜种植区域划分”功能图

Fig. 3　Which-Won-Where view of the GGE biplot for cotton lint yield data from cotton regional trials in the Yangtze River Valley in 2012 (a) and 2013 (b)

带“*”的图标为品种简称，详见表 1。图中带“+”号的 JY、SH、CD、DTH、YY、JZ、JL、XY、WH、HG、DY、NY、JJ、AQ、HF、NJ、YC、NT 和 CX 为试点代码，分别代表四川省的简阳、射洪、湖南省的常德、大通湖、岳阳、湖北省的荆州、江陵、襄阳、武汉、黄冈、监利、河南省的南阳、江西省的九江、安徽省的安庆、合肥、江苏省的南京、盐城、南通和浙江省的慈溪试点。“*” and the following abbrevations are cultivars, see Table 1 for the full name of cultivar. JY, SH, CD, DTH, YY, JZ, JL, XY, WH, HG, DY, NY, JJ, AQ, HF, NJ, YC, NT and CX prefixed with plus sign (+) are test location codes of Janyang and Shehong in Sichuan Province; Changde, Datonghu and Yueyang in Hunan Province; Jingzhou, Jiangling, Xiangyang, Wuhan, Huanggang and Jianli in Hubei Province; Nanyang in Henan Province; Jiujiang in Jiangxi Province; Anqing and Hefei in Anhui Province; Nanjing, Yancheng and Nantong in Jiangsu Province; and Cixi in Zhejiang Province, respectively.

2.5　‘鄂杂棉 30’与‘鄂杂棉 10 号’的优势种植区域比较

GGE 双标图的“成对比较”功能图可用于直接比较两个品种的优势种植区域。图 4a 表明，2012 年‘鄂杂棉 30’和‘鄂杂棉 10 号’的图标都位于等值线的右侧，各试验环境图标也都位于等值线右侧，而‘鄂杂棉 30’的图标离等值线远，说明‘鄂杂棉 30’在所有试验环境中的丰产性均优于对照‘鄂杂棉 10 号’，在长江流域棉区中种植都比对照‘鄂杂棉 10

号’更有优势，也就是‘鄂杂棉 30’与‘鄂杂棉 10 号’相比的优势区域涵盖整个长江流域棉区。图 4b 表明，2013 年‘鄂杂棉 30’和‘鄂杂棉 10 号’的图标同样都位于等值线的右侧，浙江省慈溪试点位于等值线左侧，其余各试验环境图标都位于等值线右侧，而‘鄂杂棉 30’的图标离等值线远，说明‘鄂杂棉 10 号’仅在浙江省沿海棉区的慈溪试点上优于‘鄂杂棉 30’，而在其余目标区域中‘鄂杂棉 30’的表现更好，因而其适应性更广。可见，‘鄂杂棉 30’在长江流域的绝大部分棉区中都比对照品种更有产量优势，同时也优于其余参试品种，在长江流域棉区种植优势明显。

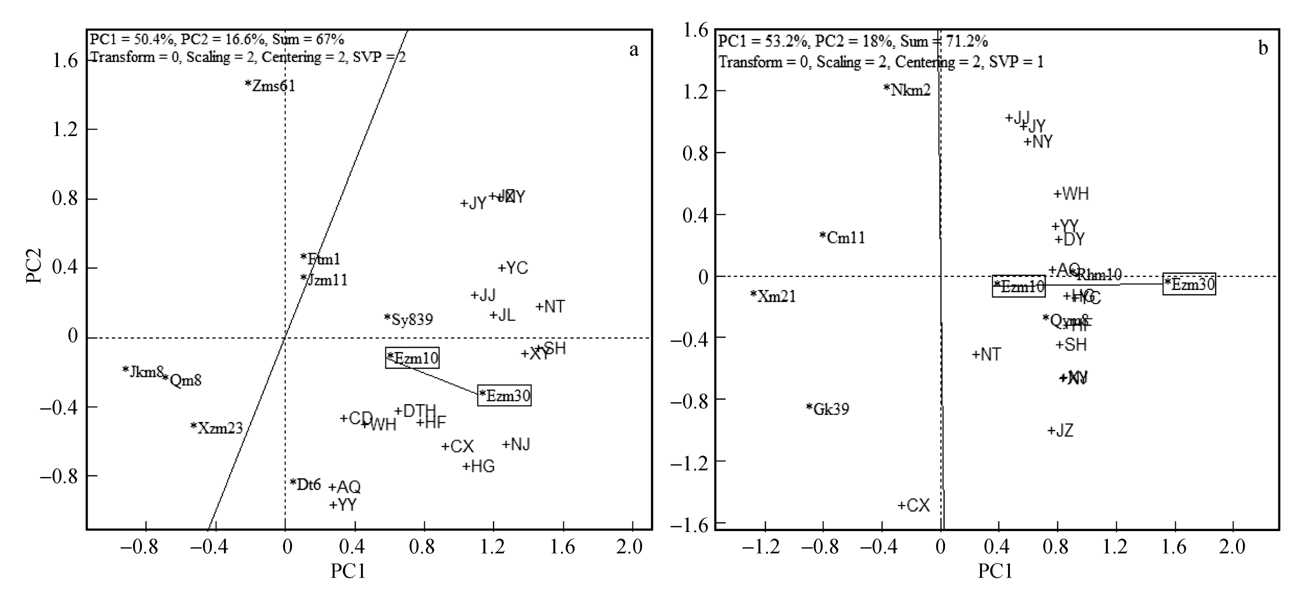


图 4 2012 年(a)和 2013 年(b)‘鄂杂棉 30’与对照品种‘鄂杂棉 10 号’的优势种植区域比较的“成对比较”GGE 双标图

Fig. 4 Pairwise comparison view of the GGE biplot for the comparison of adaptive planting region between ‘Ezamian 30’ and the check cultivar ‘Ezamian 10’ in 2012 (a) and 2013 (b)

3 讨论与结论

3.1 棉花品种高产和稳产性同步评价的必要性和可行性

在作物多环境品种试验中产量表现受到基因型、环境和基因型与环境互作效应的共同影响，其中环境主效是变异的主要来源，而基因型与环境互作效应对变异的贡献通常大于基因型主效[28]。基因型与环境互作效应是影响品种稳定性和适应性的关键因素，只有充分研究利用可重复的基因型与环境互作效应，才能提高稳产性育种的选择效率[29]。AMMI模型分析和GGE双标图分析是目前基因型与环境互作效应最常用的统计方法，其中AMMI模型首先用传统的方差分析分解基因型与环境的加性主效应，再用主成分分析方法剖分残差的互作效应，可以有效地对基因型与环境互作效应进行分解和品种稳定性分析[30]，但是忽视品种的丰产性，抽象地探讨品种的稳定性无论是对育种还是生产应用都是没有意义的[14]，应当对品种的丰产性与稳产性进行同步评价和综合选择。Yan等[12]提出的GGE双标图模型将基因型主效和基因型与环境互作效应相结合，可以直观地展示品种的丰产性和稳产性，便于对品种的丰产性和稳产性进行同步评价和选择，是对品种高产稳产性评价的最实用有效的统计方法。本研究采用GGE双标图的“丰产性和稳定性”和“理想品种”功能图对2012—2013年长江流域国家棉花区域试验中的‘鄂杂棉30’等参试品种的丰产性和稳产性分析表明，‘鄂杂棉30’在两年区域试验中的丰产性突出，稳产性优良，丰产性和稳产性综合评价的理想指数显著优于在长江流域棉区大面积推广应用的对照品种‘鄂杂棉10号’及其余参试品种，是高产稳产的优良新品种。本研究结果明确了‘鄂杂棉30’的丰产与稳产特性，对该品种的科学合理应用提供了理论依据，同时也进一步证实了GGE双标图模型在棉花品种高产稳产性同步评价方面的可行性和应用效果。

3.2 棉花新品种广适性和特殊适应性的育种策略探讨

我国农作物品种在区域试验和品种审定过程中仍然主要依据品种在多环境试验中的平均表现进行品种评价，实际上是将目标种植生态区域默认为一个同质的品种生态区[26]。如果默认的假设不成立，

那么就不能充分发挥基因型与特殊适应性环境的正互作效应的增产潜力。针对存在多个品种生态区的复杂目标区域的广适性育种，选育出具备跨品种生态区的高产品种，同时在各品种生态区中表现优良的广适性高产品种，相比于同质品种生态区中的高产育种更加困难[19]。在这种情况下，科学利用基因型与环境互作效应的有效途径之一是将目标种植区域划分成几个潜在的相对同质的品种生态区，然后针对品种生态区开展特殊适应性育种，可以大幅提高育种效率和品种推广应用的可靠性[12]。我国长江流域棉区地域辽阔，涵盖长江上游、中游和下游的四川、湖南、湖北、河南、安徽、江西、江苏、浙江省的广大棉区，各地区的自然生态环境不同，土壤因子和气象条件也存在显著的差异[18]。在我国当前针对主要农作物品种区域试验以广适性评价为主和实行国家与省级二级审定制度的条件下，长江流域棉区的棉花育种应当采用广适性和特殊适应性育种相结合的方式。可以在整个长江流域目标环境一体化的大框架下，采用广适性的育种方式，选择适合于长江流域棉区的适应广的“大品种”；同时也应当针对目标环境中存在的特殊品种生态区或者利用省级区域试验选择具有特殊适应性的“小品种”，从而有针对性地进行品种选择和利用，充分发挥品种与环境最佳组合对生产的促进作用，避免特殊不适应品种与环境组合可能带来的生产风险。GGE 双标图方法已经广泛地应用于多种农作物的品种生态区划分和品种适宜种植区域划分[19-21]。本研究利用 GGE 双标图对‘鄂杂棉 30’等参试品种在长江流域的适宜种植环境进行了充分评价，同时利用 GGE 双标图的“成对比较”功能图将‘鄂杂棉 30’与对照品种在长江流域的产量表现进行了相互比较。结果表明，‘鄂杂棉 30’在两年试验中表现出对长江流域棉区最广泛的适应性，在与对照品种的成对比较中也体现出绝对的区域适应性优势。研究结果明确了‘鄂杂棉 30’是长江流域棉区普适性的品种，结合其高产和稳产的特征，说明‘鄂杂棉 30’是针对长江流域棉区广适性育种的成功例证，同时也说明 GGE 双标图的“适宜种植区域划分”功能图对品种的适宜种植区域划分的有效性和实用性。

参考文献 References

[1] Mohammed Y A, Chen C C, McPhee K, et al. Yield performance and stability of dry pea and lentil genotypes in semi-arid cereal dominated cropping systems[J]. Field Crops Research, 2016, 188: 31–40

[2] 常磊, 柴守玺. GGE 双标图在我国旱地春小麦稳产性分析中的应用[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(5): 988–994
Chang L, Chai S X. Application of GGE biplot in spring wheat yield stability analysis in rainfed areas of China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(5): 988–994

[3] Silva K B, Bruzi A T, Zuffo A M, et al. Adaptability and phenotypic stability of soybean cultivars for grain yield and oil content[J]. Genetics and Molecular Research, 2016, 15(2): 1–11

[4] Xu N Y, Fok M, Zhang G W, et al. The application of GGE biplot analysis for evaluating test locations and mega-environment investigation of cotton regional trials[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 13(9): 1921–1933

[5] Yan W K, Frégeau-Reid J, Pageau D, et al. Genotype-by-environment interaction and trait associations in two genetic populations of oat[J]. Crop Science, 2016, 56(3): 1136–1145

[6] 汪洲涛, 苏炜华, 阙友雄, 等. 应用 AMMI 和 HA-GGE 双标图分析甘蔗品种产量稳定性和试点代表性[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(6): 790–800
Wang Z T, Su W H, Que Y X, et al. Analysis of yield stability and test site representativeness of sugarcane trials using combined AMMI and HA-GGE biplot models[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(6): 790–800

[7] Annicchiarico P. Joint regression vs AMMI analysis of genotype-environment interactions for cereals in Italy[J]. Euphytica, 1997, 94(1): 53–62

[8] van Eeuwijk F A, Malosetti M, Yin X Y, et al. Statistical models for genotype by environment data: From conventional ANOVA models to eco-physiological QTL models[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 2005, 56(9): 883–894

[9] DeLacy I H, Redden R J, Butler D G, et al. Analysis of line × environment interactions for yield in navy beans. 3. Pattern analysis of environments over years[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 2000, 51(5): 619–628

[10] Yan W K. Singular-value partitioning in biplot analysis of multienvironment trial data[J]. Agronomy Journal, 2002, 94(5): 990–996

[11] Zobel R W, Wright M J, Gauch H G. Statistical analysis of a yield trial[J]. Agronomy Journal, 1988, 80(3): 388–393

[12] Yan W K, Hunt L A, Sheng Q L, et al. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot[J]. Crop Science, 2000, 40(3): 597–605

[13] 李辛村, 张恩和, 董孔军, 等. 用 AMMI 双标图分析糜子品种的产量稳定性及试点代表性[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(4): 422–426
Li X C, Zhang E H, Dong K J, et al. AMMI-Biplot analysis of yield stability and test-site representativeness of proso-millet cultivars[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(4): 422–426

[14] Yan W K, Kang M S, Ma B, et al. GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype-by-environment data[J]. Crop Science, 2007, 47(2): 643–655

[15] Yan W K. GGEbiplot — A windows application for graphical analysis of multienvironment trial data and other types of two-way data[J]. Agronomy Journal, 2001, 93(5): 1111–1118

[16] 许乃银, 金石桥, 张国伟, 等. HA-GGE 双标图在长江流域棉花品种区域试验中的应用[J]. 棉花学报, 2013, 25(6):

517–524
Xu N Y, Jin S Q, Zhang G W, et al. The effectiveness of HA-GGE biplot application in analyzing the data from the national cotton cultivar regional trial in the Yangtze river valley[J]. Cotton Science, 2013, 25(6): 517–524
[17] Sarkar B, Sharma R C, Verma R P S, et al. Identifying superior feed barley genotypes using GGE biplot for diverse environments in India[J]. Indian Journal of Genetics and Plant Breeding, 2014, 74(1): 26–33
[18] 许乃银, 李健. 利用 GGE 双标图和综合选择指数划分棉花品种生态区[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(9): 1113–1121
Xu N Y, Li J. Using GGE biplot and comprehensive selection index to investigate mega-environments of cotton cultivar[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(9): 1113–1121
[19] Yan W K. Mega-environment analysis and test location evaluation based on unbalanced multiyear data[J]. Crop Science, 2015, 55(1): 113–122
[20] 唐淑荣, 许乃银, 杨伟华, 等. 基于 GGE 分析的西北内陆棉区纤维品质生态区划分[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(12): 1674–1682
Tang S R, Xu N Y, Yang W H, et al. Ecological regionalization of cotton fiber quality in the Northwest Inland Region using GGE analysis[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(12): 1674–1682
[21] 许乃银, 李健. GGE 双标图的信息比校正原理与应用——以长江流域棉花品种生态区划分为例[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(9): 1169–1177
Xu N Y, Li J. Principles and applications of information ratio adjustment of GGE biplot — A case study of cotton mega-environment investigation in the Yangtze River Valley[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(9): 1169–1177
[22] 慕平, 赵桂琴, 柴继宽. 基于 GGE-Biplot 的甘肃省不同生态区燕麦生产性能及适应性分析[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(6): 705–712
Mu P, Zhao G Q, Chai J K. Analysis of oats productivity and adaptability in different ecological regions of Gansu Province using GGE-Biplot[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(6): 705–712
[23] Klomsa Ard P, Patanothai A, Jaisil P. Efficient test sites for multi-environment evaluation of sugarcane genotypes in Thailand[J]. International Journal of Plant Production, 2013, 7(4): 763–790
[24] Yan W K, Kang M S. GGE Biplot Analysis: A Graphical Tool for Breeders, Geneticists, and Agronomists[M]. Boca Raton, London, New York, Washington D C: CRC Press, 2003
[25] Yan W K. Crop Variety Trials: Data Management and Analysis[M]. Oxford, UK: Wiley-Blackwell, 2014
[26] 严威凯. 双标图分析在农作物品种多点试验中的应用[J]. 作物学报, 2010, 36(11): 1805–1819
Yan W K. Optimal use of biplots in analysis of multi-location variety test data[J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(11): 1805–1819
[27] Yan W K, Tinker N A. Biplot analysis of multi-environment trial data: Principles and applications[J]. Canadian Journal of Plant Science, 2006, 86(3): 623–645
[28] 许乃银, 张国伟, 李健, 等. 基于 GGE 双标图和比强度选择的棉花品种生态区划分[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(11): 1500–1507
Xu N Y, Zhang G W, Li J, et al. Investigation of cotton mega-environment based on fiber strength selection and GGE biplot[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(11): 1500–1507
[29] Yan W K, Hunt L A. Interpretation of genotype × environment interaction for winter wheat yield in Ontario[J]. Crop Science, 2001, 41(1): 19–25
[30] Gauch H G Jr. Statistical Analysis of Regional Yield Trials: AMMI Analysis of Factorial Designs[M]. Amsterdam: Elsevier, 1992